长期冰川学观测引领 大陆性和干旱区冰川变化与影响研究

李忠勤　王飞腾　李慧林　徐春海　王璞玉　周　平　岳晓英

中国科学院西北生态环境资源研究院 天山冰川观测试验站 乌鲁木齐 830035

摘要　中国是中纬度山地冰川大国，冰川科学研究十分重要。冰川还是我国西部干旱区重要的水资源——我国及周边国家大江大河的源头，由冰川变化引发的水文、水资源变化对于我国西北干旱区山盆地理结构的生态系统具有决定性意义。中国科学院天山冰川观测试验站（以下简称“天山冰川站”）建立于中国冰川学开创之初的1959年，围绕乌鲁木齐河源1号冰川（以下简称“1号冰川”）的研究，对中国冰川科学理论的形成和发展起着关键性作用，亦是对国际冰川学的重要发展和贡献。以乌鲁木齐河山区流域综合观测试验为基础的水文学研究，奠定了我国内陆河流域水文研究基础。60年来，作为中国冰川学观测、试验、研究和人才培养的基地，对外开放交流的平台，天山冰川站在冰川物理学、冰川对气候变化的响应、冰川水文、雪冰物理化学过程、第四纪冰川、冰缘植被与生态等研究方向取得系统性创新成果，为中国的冰川学事业作出了卓越贡献。世界冰川监测服务中心（WGMS）将1号冰川列为全球10条重点观测研究的参照冰川之一，即作为中国和中亚干旱区的参照冰川，其长期、系统的观测研究成为许多国家冰川学研究的参照和典范。

关键词　乌鲁木齐河源1号冰川，冰川物质平衡，冰川水文，雪冰过程

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2018.12.012

目前地球表面的10%以上为冰川所覆盖。冰川是地球上重要的固态水资源，储存着世界淡水资源的68.7%。全球（不包括南极与格陵兰冰盖）共发育山地冰川215 547条，总面积达705 739 km^2，单条冰川平均面积为3.28 km^2，以分布在距海岸线较近的高纬度海洋性冰川为主。中国是中纬度山地冰川大国，发育冰川48 571条，面积为5.18×10^4 km^2，单条冰川平均面积约1 km^2，以高海拔大陆性冰川为主。冰川（包括冰盖）作为冰冻圈要素之一，以其对气候的高度敏感性和重要反馈作用而倍受关注。在受气候变化影响的诸多环境系

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20060201）
修改稿收到日期：2018年11月29日

统变量中，冰川是全球变化最快速、最显著、最具指示性的地理要素。过去30年来，全球冰川加速消融退缩，造成海平面上升、水循环变化、冰川灾害增加，引发高度关注。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告指出，末次盛冰期以来，全球海平面平均上升了120 m，主要原因是冰盖和冰川消融，陆地上的水体大量转入海洋。目前山地冰川对海平面上升的贡献为（0.76±0.37）mm/a，是仅次于海洋热膨胀的海平面上升第二大贡献者。我国西部干旱区的冰川主要包括新疆境内20 695条、青海境内3 802条和甘肃境内1 538条，总面积达27 360.73 km^2，被称为“亚洲水塔”，是维系生态环境、保障城乡工农业生产以及居民用水的重要水资源。该区冰川融水占出山口径流的25%—29%，一方面在水资源构成上具有举足轻重的作用，另一方面作为“固体水库”的冰川，在年际和年内两种尺度上对河川径流起到“削峰填谷”的调节作用。冰川变化造成的水资源变化，对干旱区山盆地理结构的生态系统具有决定性的意义。气候变暖对水资源的影响，首先使冰川融水径流增大，而径流增加是以消耗冰川固体冰为代价的，随着冰川储量的迅速减少，冰川融水径流也会随之急剧减少。冰川剧烈消融，还会引发冰川洪水、冰川泥石流、冰川跃动等冰川灾害。

中国科学院天山冰川观测试验站（以下简称“天山冰川站”）建立于中国冰川学开创之初的1959年，标志着中国冰川学研究从无到有，从野外考察走向定位观测试验。围绕乌鲁木齐河源1号冰川（以下简称“1号冰川”）的研究，对中国冰川科学理论的形成和发展起到了关键性作用。国际上，经典的冰川学理论以海洋性冰川和冰盖的研究为基础，缺乏对大陆性和干旱区冰川的观测研究。天山冰川站的观测研究，填补了这一领域诸多空白，是对国际冰川学的重要发展和贡献。天山冰川站所处的中国西北内陆和亚洲中部干旱区，水资源是制约社会经济发展的瓶颈和维系生态环境的命脉，而山区则是水资源的形成区。天山冰川站开创以乌鲁木齐河山区流域综合观测试验为基础的水文学研究，奠定了我国内陆河流域水文研究基础，其围绕干旱区冰川水资源的时空变化及其对水文、水资源影响的研究成果，为国家重大决策、西北地区水资源管理与高效利用、区域经济社会可持续发展战略规划提供了重要的科学依据。

60年来，作为中国冰川学观测、试验、研究和人才培养的基地，对外开放交流的平台，天山冰川站为中国的冰川学事业作出了卓越贡献。世界冰川监测服务中心（WGMS）将1号冰川列为全球10条重点观测研究的参照冰川之一，即作为中国和中亚干旱区的参照冰川，其长期、系统的观测研究成为许多国家冰川学研究的参照和典范[1-4]。

1 建立了冰川监测网络数据平台，为大陆性和干旱区冰川、西北地区冰川与水文水资源、生态环境保护等研究提供了必要的后勤保障，奠定了坚实的数据基础

山地冰川分布于地球表面最高处，高山之巅。受极端寒冷、氧气稀薄、人烟稀少和交通不便等诸多不利因素的影响，冰川观测极为困难。全世界拥有50年以上观测资料的冰川不足5条，拥有30年以上观测资料的冰川仅有40条左右。冰川观测数据在全球范围极为匮乏，因而冰川学是建立在对少数冰川的观测基础上，不断发展完善的学科。为更好地研究整个西北干旱区的冰川，天山冰川站一直致力于增加1号冰川之外参照冰川的观测研究。1998年8月，选择奎屯河哈希勒根51号冰川作为第二个定位监测的参照冰川，至今已有20年观测资料。2004年8月和2008年8月，分别选取哈密庙尔沟冰帽和托木尔峰青冰滩72号冰川作为第三和第四条参照冰川，并围绕这两条参照冰川逐步建立起哈密地区哈尔里克山和阿克苏河上游冰川、水文与气象监测系统。由此形成一个以1号冰川为中心，辐射天山东西两端1 700 km、较为完善的天山冰川监测网络。2011年，天山冰川站与喀纳斯景区签署协议成立“阿尔泰山冰川积雪与环境观测

研究站”，建成阿尔泰山站气象、冰川、积雪、水文、湖面水位等观测系统。2016年与新疆吉木乃县政府联合建立“阿尔泰山冰冻圈科学与可持续发展综合观测研究站”，将木斯岛冰川设为参照冰川，开展长期定位观测研究。2010年10月，天山冰川站将冰川观测研究拓展到祁连山脉，将黑河上游葫芦沟流域面积最大的冰川命名为“十一冰川”，与中国科学院黑河上游生态-水文试验研究站联合对其开展连续系统的观测研究。在此期间，天山冰川站还设立了半定位观测点，对博格达峰的扇形冰川、四工河4号冰川、玛纳斯河源鹿角湾冰川、奎屯河哈希勒根48号冰川、阿尔泰山布尔津河18号冰川、西昆仑山公格尔九别峰克拉亚依拉克冰川等进行观测研究。上述定位与半定位站（点）相互结合，形成了完整覆盖西北干旱区冰川的监测网络。2014年，天山冰川站开始承担中国北极黄河站AustreLovénbreen和Pedersenbreen两条参照冰川的观测研究工作，将天山冰川站冰川观测经验和规范应用到极地。

在扩大冰川观测范围的同时，天山冰川站还强化和规范了观测方法和数据质量控制，与国际全面接轨。《冰川及其相关观测方法与规范》[5]和《冰川动力学模式基本原理和参数观测指南》[6]即为天山冰川站制定并执行，是在其他冰川研究区得到广泛应用的观测工作指南。2010年，世界冰川监测中心召集多个国际相关组织和各国的国家冰川监测通讯员在瑞士制定未来10年国际冰川监测的规划和重点任务，天山冰川站提出针对中亚干旱区的冰川监测计划和数据规范被采纳。2013年，天山冰川站进入世界气象组织（WMO）创建的全球冰冻圈观测（GCW）计划。天山冰川站观测数据在国内由多个专业平台公布，包括《天山冰川站年报》、寒旱区科学数据中心、冰冻圈科学数据平台等。在国际上的发布按照WGMS和GCW要求执行，定期发布于由国际科学理事会（ICSU）、国际大地测量学与地球物理学联合会（IUGG）、联合国环境规划署（UNEP）、联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）联合出版的资料集 *Glacier Mass Balance Bulletin*（该资料集第9期将1号冰川作为封面，图1）、*Fluctuations of Glaciers*、*Global Glacier Change Bulletin*，以及GCW网站；并被联合国环境规划署的Environmental Data Report数据集和Geo Data Portal等知名数据库，以及《中国气候变化蓝皮书》等收录，被广泛推介于冰川与全球变化研究中。IPCC第三次、第四次和第五次评估报告，以及至少8篇发表在 *Nature* 和 *Science* 上的文章使用了这些观测资料。

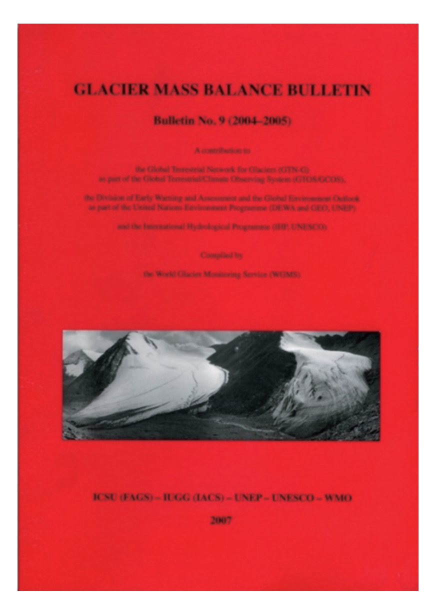


图1　世界冰川监测中心（WGMS）数据集 *Glacier Mass Balance Bulletin* 第9期以1号冰川为封面

2 开启了中国冰川物理学研究先河，通过长序列冰川物质平衡观测资料，发现山地冰川在过去50年内经历了2次加速消融过程，揭示了冰川加速消融的四大机理

20世纪80年代初，天山冰川站开启冰川学研究先河[7-9]。通过数年观测，结合国际冰川学理论，形成具有我国特色的冰川带划分理论；通过3次冰川末端人工冰洞的观测研究（图2），提出了冰川存在冰川冰变形、冰床变形、剪断和底部滑动4种运动机理。通过冰川不同海拔高度、不同深度的冰川测温孔观测，首次发现冰川浸渗带融水冻结释放的相变潜热对冰川温度的影响可达20 m以上，冰川底部末端温度处在压融点，建立了冰川温度分布

变化模型。这些研究，更新了国际冰川物理学中若干传统概念，被引入国际《冰川物理学》教科书。

冰川物质平衡是表征冰川积累和消融量值的重要冰川学参数之一。WGMS 发现，1 号冰川的物质平衡曲线与全球冰川物质平衡平均曲线相比，无论在变化幅度上还是在变化规律上都极为相似（图 2），因而可以通过 1 号冰川的观测资料来了解全球山岳冰川的平均物质平衡变化规律。在 WGMS 冰川监测网络中，1 号冰川是中国和中亚干旱区的参照冰川。2007 年，WGMS 选取 30 条参照冰川的观测结果，绘制出全球冰川的物质平衡标准曲线，此举在国际上引起很大反响并得到广泛应用，而 1 号冰川被列入其中。天山冰川站的监测表明，1960—2017 年，1 号冰川平均物质平衡量为 –341 mm/a，冰川呈加速退缩趋势。1960 年以来，冰川经历了两次加速消融过程：第一次发生在 1985 年前后，导致多年平均物质平衡量由 1960—1984 年的 –81 mm/a 降至 1985—1996 年的 –273 mm/a；第二次从 1997 年开始，更为强烈，致使1997—2017 年的多年平均物质平衡量降至 –690 mm/a，其中 2010 年冰川物质平衡量跌至 –1 327 mm，为有观测资料以来的最低值。2011 年以来，冰川物质平衡量表现出波动性变化，在经历 2011—2014 年的阶段性消融减缓后，再次转入高物质亏损状态。1960—2017 年，1 号冰川累积物质平衡量达 –19 774 mm，即假定面积不变的条件下，冰川厚度平均减薄 19 774 mm 水当量。

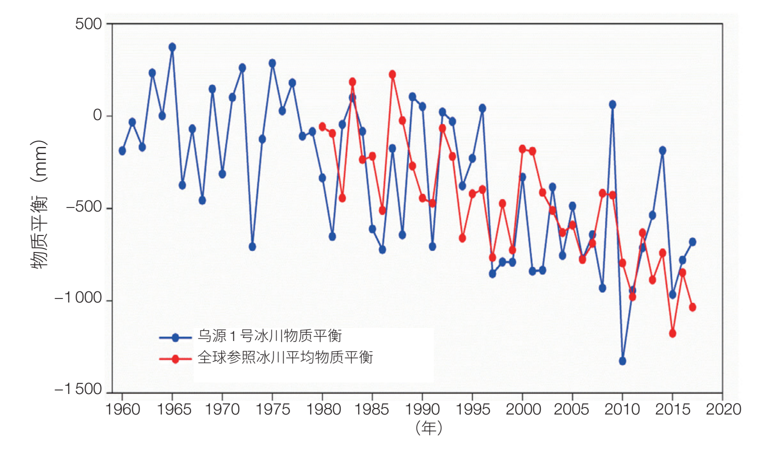


图 2　乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡与全球参照冰川平均物质平衡对比

基于 1 号冰川研究，揭示出山地冰川两次加速消融的四大机理[10-14]。① 消融期气温升高，直接造成冰川消融量增加。当气温上升到一定程度后，尽管降水有增加，也不会使得冰川物质亏损有所改变。② 冰川冰体温度的上升，减少了加热冰川表面温度达到消融点所需的热量和再冻结下渗水量，提高了冰川对气候变暖的敏感性。③ 由于冰川消融区面积不断增加导致冰川表面反照率降低的正反馈机制。低反照率的产生主要由冰川表面冰尘（cryoconite）和矿物粉尘增加所引致，冰尘对气温十分敏感，随气温的升高而大量产生。④ 冰川的破碎化加剧。破碎的冰面一方面导致冰川有效消融面积增大，使消融量增加，另一方面冰面融水更容易进入冰川内部，将热量带入冰内，加剧冰川消融。上述研究在国内外产生了重要影响，曾获得 2011 年度甘肃省自然科学奖一等奖。

3 乌鲁木齐河流域水文学研究，形成了冰川作用流域水文和气象过程观测试验研究的基本框架，奠定了我国内陆河流域水文研究基础

在我国西北内陆和亚洲中部干旱区，水资源是制约社会经济发展的瓶颈和维系生态环境的命脉。山区是水资源的形成区，长期以来，以乌鲁木齐河山区流域综合观测试验为基础，揭示了冰川、积雪、高山冻土、山区降水径流特征，通过水量平衡原理、能水平衡模型，研究模拟了山区径流的形成与变化、地表水与地下水转化过程；通过冰川模型与水文模型耦合的方法，模拟预测了径流对气候变化的动态响应。这一研究，奠定了我国内陆河流域水文水资源研究基础。天山冰川站在 1959—1965 年建站初期便开启冰川表面能量平衡、冰川融水对河流的补给作用、冰川流域水文特征、地表水和地下水转化观测试验研究的先河。1979 年天山冰川站恢复重建之后，在乌鲁木齐河流域布设了水文气象梯度观测，开

展乌鲁木齐河山区流域径流形成和估算观测试验研究，揭示了冰川、水文和微气象相互作用和径流形成的关系，形成了我国冰川作用流域水文和气象过程观测试验研究的基本框架。1995年以后，天山冰川站扩大研究区域，发展冰川水文模型，开展面向整个干旱区的冰川水资源变化与影响模拟研究[15-21]。

20世纪80年代以来，冰川的加速退缩引发的水资源时空分布和水循环过程的变化，无疑给新疆的建设布局和发展模式带来深刻影响。近年来对干旱区的观测模拟表明，托木尔峰地区的冰川比预期的消融减少要快，目前消融正盛，除非气温有大幅度升高，否则不会出现融水继续上升。未来融水径流量对气温变化的敏感性会加大，塔河流域中冰川融水比例大，一旦多数冰川消融殆尽，对南疆水资源将产生灾难性影响。冰川变化对天山北麓地区水资源的影响在不同流域的差别较大。对于以小冰川为主的河流，如乌鲁木齐河等，冰川融水会不断减少直至消失，从而丧失冰川对河流的补给和调节作用。对于以大冰川为主的河流，如玛纳斯河等，冰川融水径流仍将保持一定份额。东疆盆地水系的冰川处在加速消融状态，水资源供给量处在不断恶化之中，致使未来该区域水资源极端匮乏，供需矛盾日趋激烈。到2040年之前，祁连山黑河流域将有90.7%的冰川（数量上）消失殆尽，冰川面积也将消失59.4%以上；与此同时，北大河流域也有79.4%的冰川不复存在，面积损失率将在30.6%以上。届时，流域内冰川将基本丧失对水资源的补给和调节作用。疏勒河流域冰川在2040年前很可能有429条趋于消失；由于流域内冰川融水补给较高（30%以上），冰川的最终消失会对河流产生灾难性影响。因此，该流域何时出现融水降低的拐点，以及如何应对，值得重点关注和研究。过去50年，石羊河流域内冰川的持续缩减，已经给河水径流造成显著负面影响，使得河流水量减少，到2040年左右，随着大部分冰川的消失，造成水资源和生态环境方面的改变，值得我们进一步深入研究。

上述研究成果，深化了冰川变化及其对水资源影响的科学认识，揭示和预估了新疆不同地区冰川水资源的时空变化及其对水文、水资源的影响，为国家重大决策、西北地区水资源管理与高效利用、区域经济社会可持续发展战略规划提供了重要的科学依据，并成为中国工程院重大咨询项目“新疆可持续发展中有关水资源的战略研究”成果的重要组成部分，后者得到国务院高度重视并被地方政府决策部门应用，被新疆维吾尔自治区政府评价为“当今和今后一个时期新疆水利改革发展的指导性文件”[22]。相关成果获得2013年度和2016年度新疆维吾尔自治区科技进步奖一等奖。

4 建立TGS冰川模型，对未来冰川变化进行模拟预估，首次揭示出中国冰川未来变化过程、消亡时间及控制因素，为冰川变化影响评估、冰川保护等提供了科学依据

TGS冰川模型是天山冰川站自主研发的冰川模拟预测模型，通过这一模型，可以实现单条冰川尺度和区域尺度冰川变化的模拟预估[23,24]。模型包括：① 地理学上不同类型和不同特征冰川的模型参数化方案；② 以冰川表面能量/物质平衡简化方程为核心的物质平衡模型；③ 适合于山地冰川变化模拟的冰流模型，包括全分量冰流模型、高阶冰流模型和浅冰近似冰流模型；④ 冰川边界热量传输和底部滑动等附加模块；⑤ 由参照冰川到区域冰川的尺度转换模型，包括冰川底部形态模型等。

利用该模型对1号冰川、托木尔峰青冰滩72号冰川、哈密庙尔沟冰帽和祁连山十一冰川进行了模拟预测（图3）。结果显示，在RCP4.5排放情景下，到21世纪末，只有青冰滩72号冰川和庙尔沟冰帽这两条面积大于2 km^2的冰川存有冰量。冰川体积、面积和长度的变化过程不同，其中长度变化的波动最大。未来各种排放情景下，冰川都会快速消融退缩；升温快的情景，各参数变化也快，但不会改变其变化过程。对于一些小冰川，不同升温情景对冰川变化影响很小，原因在于几种

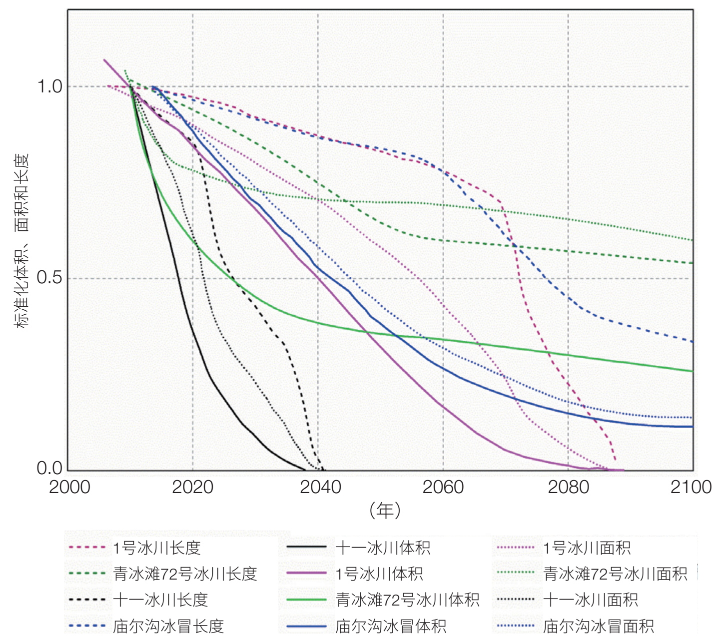


图 3 RCP4.5 排放情景下，中国干旱区 4 条参照冰川体积、面积和长度未来变化过程

情景的升温速率在最初 30 年间十分接近，并且冰川几何形态的变化主要是冰川对过去几十年甚至上百年的气候变化综合和滞后的响应，即便是气候条件不再继续变化，冰川仍将持续退缩下去，直至其规模与气候状况达到平衡。

基于上述单条冰川模拟预测结果的敏感性试验表明，在中国阿尔泰山发育的冰川中，有 261 条很可能比 1 号冰川变化、消失得快，即在 RCP4.5 排放情景下，这些冰川会在 2090 年之前全部消融殆尽，分别占现有冰川条数和面积的 91.9% 和 44.4%，届时剩余的 23 条冰川基本上分布在布尔津河流域。天山地区的冰川有 5 870 条冰川很可能比 1 号冰川变化、消失得快，分别占冰川总条数和总面积的 74.0% 和 21.5%。在 RCP4.5 排放情景下，至 2090 年前后，剩余的 2 147 条冰川有一半以上分布在塔里木河流域（55.1%），其余主要为玛纳斯河流域，博格达北坡的冰川几乎消失殆尽。整个祁连山地区有 1 838 条可能比十一冰川变化、消失得更快，分别占现有冰川总条数和总面积的 68.5% 和 17.0%。在 RCP4.5 排放情景下，至 2040 年前后，残存的 846 条冰川约有 87.6% 集中在祁连山西段的诸流域中，如疏勒河、哈尔腾河、塔塔棱河等，而东段和中段的冰川基本上消融殆尽。

对单条冰川模拟预测结果的分析表明，冰川体积及其变化过程的控制因素主要为物质平衡。物质平衡主要取决于冰川区的气候和地形条件。区域气候条件决定了该区域冰川总体规模（体积），而区域内的地形条件决定了冰川个体规模。冰川的规模是冰川物质平衡和地形条件的综合反映，而冰川补给高度在所有地形要素中最为重要。冰川面积和长度的变化过程，以冰川“退缩”和“减薄”两种变化形式的交替为特征，每一次变化形式的改变，都会在面积和长度的变化过程中形成“拐点”。而控制这两种变化形式的主要因素是冰川冰量（厚度）的分布状况。对中国境内以夏季为积累期的冰川来说，降水增加，对其未来变化的影响作用有限，保护性不强。统计分析表明，对于面积小于 30 km^{2}的冰川来说，冰川的面积与未来冰量变化存在较为显著的线性关系。在 RCP4.5 情景下，到 2100 年，全球面积小于 2 km^2 的冰川都将消融殆尽。面积小于 10 km^2 的冰川冰量的余量不足目前的 30%。

5 历时 8 年，首次观测到大气—积雪—冰川冰演化的物理、化学完整过程，为国际同行瞩目

为研究降雪转化成为冰川冰的物理化学过程，天山冰川站于 2002 年 7 月在 1 号冰川海拔 4 130 m 积累区建立了观测试验场，开展连续、系统的观测取样工作（图4）。观测项目包括气象要素和降雪成冰的物理演化过程。采集的样品包括气溶胶、雪冰、冰芯样品等。这项工作贯穿冬季极端寒冷的条件，国际上属首次。截至 2010 年 10 月，经过 8 年连续观测取样研究，揭示出 1 号冰川降雪—冰川冰演化的物理化学完整过程。该项目吸引了包括美国、德国和日本等多个国家的研究机构参与，被国际同行称为冰川过程项目（PGPI）。相关成果在国际冰川学主流期刊上发表 60 多篇学术论文，并在 2008 年 12 月美国 AGU 秋季会议



图4　大气—积雪—冰川冰演化物理、化学过程观测与取样工作

上以大会报告形式展示。

研究表明，新降雪经过一系列物理过程最终演化为冰川冰[25-30]。与此同时，气溶胶也经历了从大气到雪层记录再到冰川记录的化学过程。两个过程对气候变暖都十分敏感。与20世纪60年代相比，由于气温升高导致冰川的成冰作用发生变化，积累区新雪向细粒雪、粗粒雪和冰川冰转化所需的时间明显缩短。冰川粒雪特征发生了显著变化，表现在雪层厚度减薄、结构变简单、各种粒雪的边界变模糊。融水对雪层的改造加强。成冰作用变化导致冰川消融区持续扩大，冷渗浸带消失，其他各成冰带谱之间的界限上移，甚至冰川顶部边缘亦受强烈辐射影响呈现了消融区特征。在气溶胶从雪层记录演化到冰川记录化学过程中，自然和人为成因的矿物粉尘、重金属元素、各种化学离子、氧同位素比率记录均受到由消融产生的淋溶作用影响；淋溶作用对记录的形成和保存有很大破坏作用，其临界日均温度为 –3.6℃，低于这一温度，消融对冰川记录的影响可以忽略不计，高于这一温度，需要对记录进行分析修正。气候变暖，加剧了淋溶作用的发生，降低了冰芯记录的分辨率。降雪—冰川冰演化过程响应气候变化引起的成冰作用变化，一方面导致了冰芯记录分辨率的降低，另一方面造成冰川向“暖性”特性的逐步变化，增加了冰川对气候变化响应的敏感性。

6 结语

60年来，天山冰川站面向大陆性冰川和中亚干旱区冰川，围绕国际冰川学学科发展趋势和国家冰雪水资源重大科技需求，在冰川学、第四纪冰川、冰川水文学、冰缘植被与生态方面取得了一批系统性原创成果。出版专著20余部，发表学术论文1 300余篇，其中SCI论文300余篇，包括国际冰川学主流杂志 *Journal of Glaciology* 50余篇。培养了大批冰冻圈科学领域优秀人才。先后获得国家及省部级奖10余项，其中国家自然科学奖二等奖1项，国家科学技术进步奖二等奖1项，省部级自然科学奖一等奖2项、二等奖5项，省部级科学技术进步奖一等奖2项、二等奖1项。2次荣获中国科学院野外先进集体称号。国际冰川学会（IGS）主办的专业新闻性期刊 *ICE*（2011年157期）指出：“1号冰川是世界上仅有的少数几条具有连续50年物质平衡观测资料的冰川之一。针对1号冰川及其作用区的研究发现，以一种源源不断的方式，为冰川物理学及冰川区气象、水文和地貌研究领域作出贡献，提高了人们对天山地区生态环境及冰川演变的认识。如今，天山冰川站是一个国际合作平台，是中国和其他国家基于野外站这一模式进行观测研究的典范”[31]。

参考文献

1　康尔泗. 天山冰川观测试验站回顾和展望. 冰川冻土, 1988, 10(3): 290-295.

2　李忠勤, 叶佰生. 天山冰川观测试验站10年来的回顾与展望. 冰川冻土, 1998, 20(4): 280-286.

3　李忠勤. 中国冰川定位观测研究50年. 北京: 气象出版社, 2011: 1-486.

4　李忠勤. 辉煌与影响——中国科学院天山冰川站创新发展简介. 北京: 气象出版社, 2016: 1-150.

5　李忠勤. 冰川及其相关观测方法与规范. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008: 1-84.

6 李慧林, 李忠勤, 秦大河. 冰川动力学模式基本原理和参数观测指南. 北京: 气象出版社, 2009.

7 谢自楚, 黄茂恒. 天山乌鲁木齐河源1号冰川雪-粒雪层的演变及成冰作用. 北京: 科学出版社, 1965: 1-14.

8 Cai B L, Xie Z C, Huang M H. Mathematical models of the temperature and water-heat transfer in the percolation zone of a glacier. Cold Regions Science and Technology, 1986,12(1): 39-49.

9 Huang M H. The movement mechanisms of Urumqi Glacier No.1, Tianshan Mountains, China. Annals of Glaciology, 1992, 16: 39-44.

10 Li Z Q, Li H L, Chen Y L. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental mountain glaciers, a case study of Urumqi glacier No.1 in eastern Tianshan, central Asia. Journal of Earth Science, 2011, 22(4): 423-430.

11 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川近期研究与应用. 北京: 气象出版社, 2011.

12 Li Z Q (Guest Editor). Special Issue on Science and Monitoring of Glaciers in Northwestern China. Journal of Earth Science, 2011, 22(4): 1-118.

13 Wang P Y, Li Z Q, Li H L, et al. Comparison of glaciological and geodetic mass balance at Urumqi Glacier No. 1, Tian Shan, Central Asia. Global and Planetary Change, 2014,114: 14-22.

14 Nozomu T, Li Z Q. Characteristics of surface dust on Urumqi glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 2008,40(4): 744-750.

15 姚檀栋, 施雅风. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势. 中国科学（B辑）, 1988, 6: 657-666.

16 施雅风, 康尔泗, 张国威, 等. 乌鲁木齐河山区水资源形成和估算. 北京: 科学出版社, 1992: 1-189.

17 Kang E S. Energy-Water-Mass Balance and Hydrological Discharge. Geographisches Institute ETH, 1994, 178: 164-170.

18 康尔泗, Atsumu Ohmura. 天山冰川作用流域能量、水量和物质平衡及径流模型. 中国科学（B辑）, 1994, 24(9): 983-991.

19 Li Z Q, Wang W B, Zhang M J, et al. Observed changes in stream flow at the headwaters of the Urumqi River, eastern Tianshan, central Asia. Hydrological Processes, 2010, 24: 217-224.

20 李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96-106.

21 Sun M P, Li Z Q, Yao X J, et al. Modeling the hydrological response to climate change in a glacierized high mountain region, northwest China. Journal of Glaciology, 2015, 61(225): 127-136.

22 李忠勤. 中国工程院重大咨询项目：新疆可持续发展中有关水资源的战略研究（综合报告）. 北京: 中国工程院, 2012: 87-94.

23 Li H L, Felix N, Li Z Q, et al. An extended “perfect-plasticity” method for estimating ice thickness along the flow line of mountain glaciers. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(F1). Doi: 10.1029/2011JF002104.

24 李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟. 北京: 科学出版社, 2017.

25 Li Z Q, Ross E, E. Mosley-Thompson, et al. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at PGPI site on Urumqi Glacier No.1, eastern Tien Shan, China. Annals of Glaciology, 2006, 43(1): 250-256.

26 Wang F T, Li Z Q, You X N, et al. Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Urumqi Glacier No. 1 percolation zone, eastern Tien Shan, China. Annals of Glaciology, 2006, 43(1): 245-249.

27 Wang F T, Li Z Q, Edwards R, et al. Long-term changes in the snow-firn pack stratigraphy on Urumqi Glacier No. 1, eastern Tien Shan, China. Annals of Glaciology, 2007, 46(1): 331-334.

28 Li Z Q, Li C J, Li Y F, et al. Preliminary results from measurements of selected trace metals in the snow-firn pack on Urumqi glacier No.1, eastern Tien Shan, China. Journal of Glaciology, 2007, 53(182): 368-373.

29 Li Z Q, Zhao S H, Ross E, et al. Characteristics of individual aerosol particles over Urumqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia, China. Atmospheric Research, 2010, 99: 57-66.

30 Li Z Q, Gao W H, Zhang MJ, et al. Variations in suspended and

dissolved matter fluxes from glacial and non-glacial catchments during a melt season at Urumqi River, eastern Tianshan, central Asia. Catena, 2012, 95: 42-49.

31 Felex Ng. 50th Anniversary of Tien Shan Glaciological Station and Symposium on Science and Monitoring of Glaciers. ICE, 2011, 157: 16-19.

Science and Long-term Monitoring of Continental-type Glaciers in Arid Region in China

LI Zhongqin WANG Feiteng LI Huilin XU Chunhai WANG Puyu ZHOU Ping YUE Xiaoying

(Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830035, China)

Abstract China has 48 571 glaciers with a total area of 5.18×10^4 km^2, which accounts for 11%–14.5% of the total area of mountain glaciers in the world. These glaciers constitute a vital source of water for more than 100 million people and for wildlife ecosystems in this vast arid and semi-arid land in northwestern China. Urumqi Glacier No. 1, the best monitored glacier in China, is located at the headwaters of the Urumqi River in eastern Tianshan and is within the core area of central Asia. To implement the long term monitoring of Urumqi Glacier No. 1, the Tianshan Glaciological Station (TGS) was established by Chinese Academy of Sciences (CAS) in 1959. Since then, Urumqi Glacier No. 1 has been the subject of extensive studies. Internationally, it has been one of the ten referential glaciers in the World Glacier Monitoring Service (WGMS), and considered to be of great importance because of its special geographical position. The Urumqi Glacier No. 1 complements similar long-term monitoring programs covering more maritime-type glaciers and glaciers in transitional climates in polar, temperate, and tropical regions. Over the past 60 years, the TGS has served as a research and training base for domestic and overseas scientists and graduate students. It plays a central role in central Asian climatological, hydrological and glaciological research. As such, it is well known and highly regarded by the international scientific community. As a permanent year-round glacier station among glaciers in central Asia, it is the benchmark to which other relevant studies can make reference.

Keyword Urumqi Glacier No. 1, glacier mass balance, glacier hydrology, snow-glacier processes



李忠勤 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员，中国科学院天山冰川观测试验站站长，世界冰川监测服务处（WGMS）中国通讯员，中国冰冻圈科学学会（筹）冰川专业委员会联合主任。长期从事冰川学研究，曾参加中国首次南极内陆冰盖考察和北极斯瓦尔巴岛冰川学考察，多次组织青藏高原、天山、阿尔泰山和祁连山冰川学考察研究。参加WGMS国际冰川监测与研究计划的制定，组织建立中亚地区冰川观测网络，制定冰川观测内容及方法。发表论文270余篇，其中SCI论文50余篇，出版专著5部，参与编写专著7部。作为第一获奖人获得甘肃省自然科学奖一等奖1项，新疆维吾尔自治区科技进步奖一等奖1项。曾获中国科学院杰出青年和甘肃省优秀共产党员等称号。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

LI Zhongqin Ph.D., Professor, and Director of Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). He currently serves as Chinese National Correspondent of World Glacier Monitoring Service (WGMS) at Zurich University, Switzerland, and co-chair for glaciology committee of China Society of Cryospheric Science. Having worked on

glaciology research since 1987, Li Zhongqin has been engaged in the very first Chinese Antarctic traverse and the glaciological investigation in Arctic Svalbard. He has led and organized numerous glaciological investigations in Tibet, Tianshan, Altai, and Qilian Mountains. As one of the National Correspondents of the WGMS, he has worked on the development of international glaciological monitoring, research proposals, methods of glacier observation, and the establishment of a glacier monitoring network in central Asia. He is the author of 5 books and co-author of 7, and has published more than 270 research papers including more than 50 SCI indexed papers. Li Zhongqin was awarded a First-Class Prize of the Natural Science Award of Gansu Province in 2011, and a First-Class Prize of the Science and Technology Progress Award of Xinjiang Uygur Autonomous Region in 2013. E-mail: lizq@lzb.ac.cn

■责任编辑：刘天星